第46卷 第4期
2023年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

浑善达克沙地植被变化定量归因及多情景预测

罗嘉艳[1]， 张 靖[1]， 徐梦冉[1]， 莫 宇[1]， 同丽嘎[2]

（1. 大连民族大学环境与资源学院，辽宁 大连 116600；2. 大连民族大学建筑学院，辽宁 大连 116650）

摘 要： 在未来全球变化的背景下，我国干旱和半干旱区域植被更加敏感，平衡经济发展和环境保护仍面临重大挑战，而对干旱和半干旱区的植被进行动态监测和影响评估是一项十分必要的工作。通过分析2000—2020年浑善达克沙地归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）时空变化特征，识别导致研究区NDVI变化的驱动机制和主要的驱动因子，采用情景分析探讨其植被未来变化的轨迹。结果表明：过去20 a间，浑善达克沙地NDVI呈现波动上升趋势；放牧是影响此地区植被变化的主要因子，但放牧对其NDVI变化的影响力有逐渐减弱的趋势；情景模拟显示，浑善达克沙地虽然向恢复方向发展，但因其脆弱的生态环境，使得其植被仍受到人类活动和气候变化的胁迫。研究结果为浑善达克沙地的生态恢复和生态建设工作提供一定的理论支持，并根据当地的实际情况提出相应的对策与建议。

关 键 词： 趋势分析；地理探测器；多情景预测；NDVI；浑善达克沙地

文章编号： 1000－6060(2023)04－0614－11(0614～0624)

干旱区覆盖超过40%的陆地表面，承载全球近40%的人口[1]，也是对气候变化和人类活动最敏感的地区之一[2]。在可预见的未来，极端干旱将更加频繁[3]，干旱区面积持续扩展[4]。浑善达克沙地为距离京津最近的风沙源地[5]，自20世纪80年代末至2000年，其沙漠化快速发展[6-7]，表现为植被覆盖降低、固定沙丘活化等[8]。2000年以后，因京津风沙源等生态修复工程的实施，沙漠化的趋势得到缓解[9-11]。但过牧[12]、开垦[8]等不合理的土地利用，导致部分地区沙漠化加剧[13]、生态脆弱度增加[14]，平衡经济发展和环境保护仍存在挑战[15]。

对浑善达克沙地植被变化的研究集中在变化趋势及其驱动机制方面。前者多采用归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）/植被覆盖度[16]、净初级生产力[17]、叶面积指数[18]、地表反照率[11]等分析植被覆盖变化；对于后者，则采用相关分析[13]、回归分析[19]和趋势分析[20]等，分析植被变化趋势与驱动因素的相关性，并试图识别自然因素和人类活动在植被变化的主导作用。认为降水量、气温是控制植被分布格局的主要气候因子[17]；但也有学者认为人口[11]、载畜量[21]、耕地数量等人类活动因素对植被的影响可能大于气候因子[10]。而事实上，驱动因子间存在着复杂的、非线性的交互作用，地理探测器则可通过探测空间分异性[22]，量化和识别驱动因子之间的复杂作用。如孟琪等[23]应用该模型发现人类活动与降水量、坡度等共同影响此地区植被；马永桃等[24]认为相对湿度和人类活动、降水量和牲畜密度以双协同为主，且对植被变化解释力超过60%。

浑善达克沙地生态环境脆弱，更易受到气候变化的影响[25]，在全球未来升温1.5 ℃的情景下（概率超过40%）[26]，加之大规模的人类活动干扰，将增加此地区植被未来变化的不确定性。为此，本文试图研究以下问题：（1）2000—2020年浑善达克沙地NDVI的时空变化趋势。（2）量化气候变化和人类活动在此地区植被变化过程中的贡献，辨识各类因子

收稿日期： 2022-06-21； **修订日期：** 2022-08-15

基金项目： 国家自然科学基金（31500384，31971464）；大连民族大学2022年大学生创新创业训练计划项目（202212026134）；内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”青年科技骨干项目（NJYT-19-B31）；辽宁省联合基金项目（2020-MZLH-11）资助

作者简介： 罗嘉艳（2000-），女，本科在读，主要从事生态系统评估等方面研究. E-mail: jiudian0767@163.com

通讯作者： 张靖（1981-），男，讲师，主要从事生态系统评估等方面研究. E-mail: zhangjing@dlnu.edu.cn

驱动强度是否发生变化。(3) 预测该区植被覆盖未来可能的变化轨迹。通过研究，以期为浑善达克沙地生态管理和生态建设提供决策支持，以应对未来气候变化所带来的不利影响。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古中部锡林郭勒草原最南端，地理位置介于112.0°~117.5°E，42.0°~43.5°N之间，东西长450 km，平均海拔1200 m；属中温带大陆性气候，年均气温1.5 ℃；年降水量为150~450 mm，东西跨度大，年降水量的80%集中在夏季；主要生境类型包括固定沙地、半固定沙地、流动沙地；地带性土壤为栗钙土，非地带性土壤为风沙土；水分条件的差异导致东部为稀树草原景观，西部为荒漠草原景观，植被逐渐从中生植物群落向旱生植物群落过渡[27]。

1.2 数据来源与处理

以NDVI代表浑善达克沙地的植被生长状态，该数据来源于美国国家航空航天局网站(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search)的MOD13Q1数据产品，采用HANTS滤波(https://envi.geoscene.cn/appstore/)消除异常值的影响，生成2000—2020年NDVI年最大值合成数据集。气候数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)，在ArcGIS 10.3中采用克里金空间插值转换为栅格数据(2000—2020年)；高程数据(DEM)来源于美国地质调查局网站的SRTM DEM (https://glovis.usgs.org)，在ArcGIS 10.3中计算得到坡度、坡向数据；土壤类型数据来自于《世界和谐土壤数据库V1.2》(https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en)；植被类型数据来自于《内蒙古自治区植被类型图》1:1500000植被类型图；土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)，2000—2020年每5 a一期；2000—2020年人口密度数据来源于WorldPop发布的世界人口密度地图(https://www.worldpop.org/geodata/listing?id=76)。牲畜数量由2000—2020年《锡林郭勒盟统计年鉴》中获取，采用基于NDVI的空间插值的方法空间化[28]，计算公式如下：

$$SU_i = NDVI_i \times \frac{SUaggr_i}{NDVIsum_i} \tag{1}$$

式中：SU_i为第i年牲畜饲养空间化图层；$NDVI_i$为第i年NDVI图层；$SUaggr_i$为第i年各(旗)县牲畜总数图层，由牲畜饲养统计数据与(旗)县界线图层连接得到；$NDVIsum_i$为第i年NDVI(旗)县区域累加和值图层。上述数据均通过投影转换、裁剪，生成分辨率为250 m的栅格。

1.3 研究方法

采用Theil-Sen中值趋势(Theil-Sen median trend analysis，T-S分析)和M-K检验(Mann-Kendall test)分析浑善达克沙地NDVI时空变化特征，使用地理探测器识别影响该沙地NDVI变化的人为和自然因素，结合筛选出的驱动因子，利用CA-Markov模型对该区NDVI进行多情景预测。

1.3.1 Theil-Sen中值趋势分析 T-S分析是一种非参数统计方法，适用于存在异常值的时间序列趋势分析[29]，公式如下：

$$S = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right),\quad 1 \leqslant i \leqslant j \leqslant n \tag{2}$$

式中：S为时间序列数据的斜率，反映数据的变化趋势，当$S>0$时，NDVI呈上升趋势变化，$S<0$时，NDVI呈下降趋势变化；median为时间序列的中位数函数；x_i和x_j分别为时间序列i年和j年的值；n为此研究中时间序列数据的长度。M-K检验用于检验序列的变化趋势和突变出现时间[30]。选取检验显著性水平$\alpha=0.05$，结果划分为显著变化($|Z|>1.64$)和不显著变化($|Z|\leqslant1.64$)。

1.3.2 驱动因子提取 考虑到数据的可获取性、区域代表性，并参考相关文献[31-32]，从自然因素和人类活动等方面选取11种检测因子(表1)，并以每5 a为1个研究时期，探测影响研究区NDVI分布及变化的影响因子。使用ArcGIS 10.3的Fishnet工具，在区域内生成2 km×2 km网格，提取网格中心点坐标和栅格值，代入地理探测器中计算。

1.3.3 地理探测器 选择地理探测器(http://www.geodetector.cn)中两种探测器，以揭示研究区NDVI变化的驱动机制。

(1) 因子探测：将NDVI作为因变量，各因子作为自变量，则影响区域NDVI分异决定值q为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} n_h \sigma_h^2}{n\sigma^2},\quad h = 1, 2, 3, \cdots, L \tag{3}$$

式中：q为度量空间分异性的指标；L为分类数目；n_h

表1 浑善达克沙地NDVI影响因子

Tab. 1 Influence factors of NDVI in Otindag Sandy Land

类型I	类型II	指标	代码
自然因素	气候	年均温/℃	TEM
		年降水量/mm	PRE
		年均风速/m·s^{-1}	WND
	地形	高程/m	ELEV
		坡度/(°)	SLP
		坡向/(°)	ASP
	土壤	土壤类型	SOIL
	植被	植被类型	VGT
人类活动		土地利用类型	LUC
		人口密度/人·km^{-2}	POP
		牲畜数量/头	SHEEP

和n分别为层h和全区的样本单元数；σ_h^2和σ^2分别为h和全区的方差。q的取值范围为[0, 1]，q值越大，说明影响因子对NDVI变化的解释力越强[33]。

（2）交互作用探测：用于识别驱动因子之间的交互作用。通过计算两种因子的q值之和与影响因子两两联合的q值，来判断2个因子的交互作用对NDVI的影响是增强还是减弱，或者2个因子是独立起作用（图1）。

1.3.4 植被变化趋势模拟与多情景预测 CA-Markov模型既保持了CA模拟复杂系统空间的能力又发挥了Markov模型进行长期预测的功能[34]。CA通常包括单元、状态、邻近范围、转换规则4个基本要素，表达式如下：

$$S_{t+1}=f(S_t,\ N) \tag{4}$$

式中：S_{t+1}、S_t分别为t+1、t时刻系统的分布状态；f为局部空间元胞状态的转化规则；N为元胞的邻域。若一个过程存在有限多个时序，其任意时刻t_{n+1}的元胞a_{n+1}只与其前一时刻t_n的元胞a_n相关，可认为该过程存在马尔科夫性，则CA-Markov模型可以表示为：

$$S_{t+1}=P_{ij}\times S_t \tag{5}$$

式中：P_{ij}为状态转移矩阵。

采用GeoSOS-FLUS软件（http://www.geosimulation.cn/flus.html）进行多情景分析。因模型输入数据需使用离散型栅格，故将NDVI分为5个级别：高度植被覆盖区（NDVI>0.6）、较高植被覆盖区（0.5<NDVI≤0.6）、中度植被覆盖区（0.4<NDVI≤0.5）、较低植被覆盖区（0.3<NDVI≤0.4）、低度植被覆盖区（NDVI≤0.3）。以2010年和2015年的NDVI空间分布图作为基础数据，计算得到NDVI转移矩阵和适宜性图谱以作为转换规则，模拟2020年研究区的NDVI分布，并与真实值作Kappa精度分析，以检验模型在植被变化动态预测中的可靠性。

基于地理探测器的分析结果（表3，选择标准为q>0.3），利用CA-Markov模型，通过调控主导驱动因子（自然因子和人类活动因子）范围值的大小，将2030年作为目标年，设定以下7种发展情景（表2）。

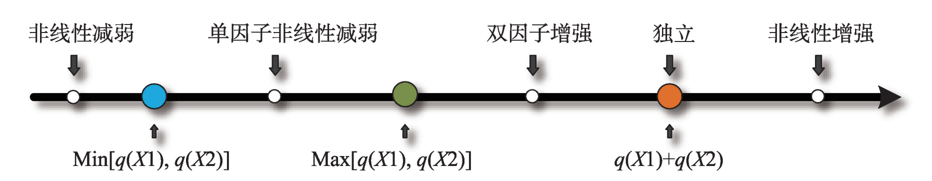
2 结果与分析

2.1 浑善达克沙地NDVI变化时空分布特征

2000—2020年NDVI提高区域的面积（77.97%）大于减少区域的面积（11.11%），其余10.92%的区域变化不明显。从空间分布上看，NDVI提高区域分布在浑善达克沙地东北部、东南部和中部，NDVI减少区域呈斑块状分布在中部和东部地区（图2a）。从时间尺度看（图2b），研究区NDVI呈现波动上升趋势，最大值出现在2018年和2019年，但其NDVI仍处于较低水平（均值为0.19）。

2.2 浑善达克沙地NDVI变化驱动机制分析

2.2.1 不同时期探测因子变化 因子探测结果（解释力q值）反映各因子对浑善达克沙地NDVI影响的大小。总体来看（表3），2001—2020年各时期q值最强的因子为牲畜数量（SHEEP），平均值0.65；其他因



注：q为度量空间分异性的指标；$X1$、$X2$分别为导致NDVI变化的影响因子1和2。

图1 2个变量对区域NDVI变化的交互作用（修改自王劲峰等[22]）

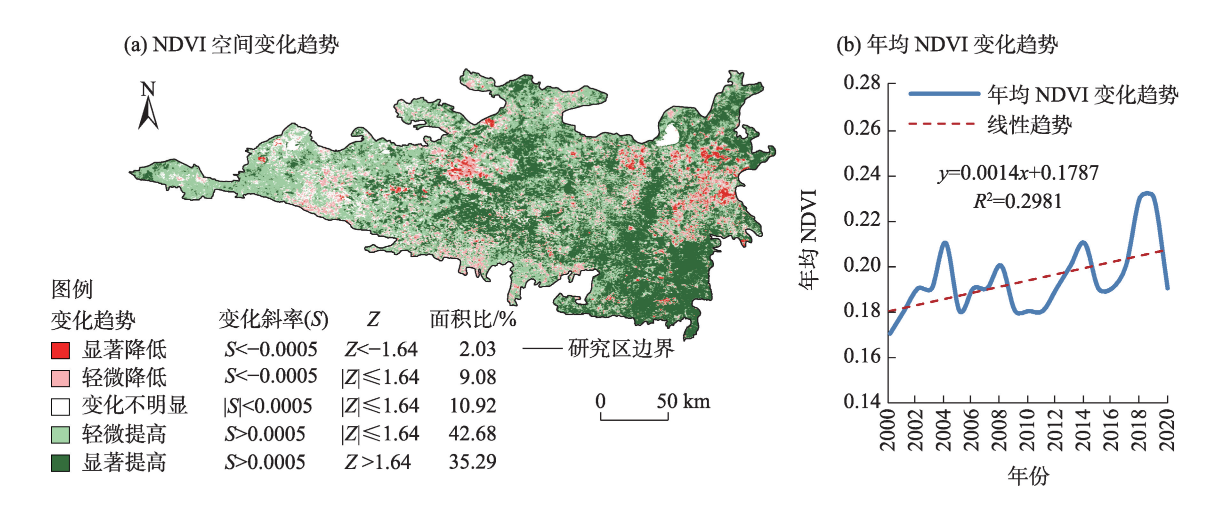
Fig. 1 Interaction of two variables on NDVI changes (Modified from Wang et al[22])

表2　多情景预测的参数设置

Tab. 2　Parameters for multi-scenario prediction

情景	情景名称	情景变化参数
惯性发展情景	惯性发展	驱动因子不做处理,遵循NDVI的惯性发展规律
气候变化情景[1]	降水增多	调整降水值,将降水的值总体提升25%,其余因子不做处理
	降水降低	调整降水值,将降水的值总体降低25%,其余因子不做处理
	风速提高	调整风速值,将风速的值总体提升25%,其余因子不做处理
	风速降低	调整风速值,将风速的值总体降低25%,其余因子不做处理
经济优先情景[2]	放牧压力增加	调整牲畜数量,将牲畜数量的值总体提升50%,其余因子不做处理
生态保护情景[2]	放牧压力减少	调整牲畜数量,将牲畜数量的值总体降低50%,其余因子不做处理

注:1表示根据IPCC第六次报告[35]和地理探测器的分析结果(表3),并做适当调整;2表示根据研究区多年牲畜数量变化特征并做适当调整;NDVI为归一化植被指数。



注:NDVI为归一化植被指数;Z为统计的值。下同。

图2　2001—2020年浑善达克沙地NDVI变化趋势

Fig. 2　NDVI change trend of Otindag Sandy Land from 2001 to 2020

表3　2001—2020年浑善达克沙地探测因子*q*值变化

Tab. 3　Variation of *q* value of driver factors in Otindag Sandy Land from 2001 to 2020

年份	因子										
	TEM	PRE	WND	ELEV	SLP	ASP	SOIL	VGT	LUC	POP	SHEEP
2001—2005	0.09	0.54	0.53	0.49	0.08	0.04	0.25	0.08	0.14	0.05	0.74
2006—2010	0.12	0.49	0.50	0.42	0.09	0.04	0.25	0.07	0.14	0.02	0.60
2011—2015	0.16	0.54	0.53	0.47	0.08	0.04	0.24	0.08	0.13	0.04	0.64
2016—2020	0.20	0.57	0.54	0.49	0.09	0.03	0.25	0.08	0.13	0.08	0.62

子排序为年降水量(PRE)>年均风速(WND)>高程(ELEV),它们在各阶段*q*值均在0.40以上;土地利用类型(LUC)、年均温(TEM)、土壤类型(SOIL)对NDVI影响一般(*q*值平均为0.12~0.25);坡向(ASP)、人口密度(POP)、植被类型(VGT)及坡度(SLP)对NDVI影响的*q*值较低(平均为0.02~0.09)。

由各研究时段来看,2001—2020年TEM、PRE和POP的*q*值总体呈上升趋势,而SHEEP的*q*值呈现降低的趋势(*q*值由0.74降低到0.62),其他因子变化幅度不明显。意味着近年来气候因子对NDVI的影响力增大,而放牧等人类活动对NDVI的影响力在逐渐减弱。

2.2.2　不同时期探测因子交互作用　不同研究时段下各探测因子交互作用下的*q*值均大于任意单因子

的q值(图3),表现为双因子增强和非线性增强,不存在独立或减弱关系。在2001—2005年和2006—2010年这2个时段,WND和SHEEP的交互作用最强(q值分别是0.82和0.69);而在2011—2015年和2016—2020年这2个阶段,SOIL和SHEEP的交互作用最强(q值均为0.73)。

在整个研究时段中,各因子间的交互作用亦发生变化,表现为气候因子与其他因子的作用增强、人类活动因子与其他因子交互作用减弱。不同时期下气候因子间交互作用下的q值增幅显著,表明气候因子间交互协同作用对NDVI影响较大,说明气候因子间是相互作用而非独立影响NDVI的空间分布,具体表现为:除SHEEP外,TEM、PRE与其他因子交互作用的q值均有小幅的增加(幅度0.01~0.10);WND则表现出与SOIL、LUC和SHEEP等因子交互作用减弱的趋势,但变化幅度较小,分别减少0.03、0.04和0.09。在人类活动因子中,POP表现出与其他因子的交互作用增强的变化趋势,但q值变化幅度较小;而SHEEP与其他因子间的交互作用q值在整个研究时段的有减少趋势(减少幅度分别为0.08~0.13),表明随着时间的推移,放牧对NDVI的影响逐渐减弱,但放牧依然是影响NDVI变化的主要原因。地形、土壤和植被等因子间交互作用q值变化不明显(在±0.01间波动)。

2.3 基于CA-Markov模型的NDVI时空变化模拟及预测

通过对比2020年实际NDVI数据与模拟NDVI数据(图4),模拟总体精度为65%、最佳优值系数

(a) 2001—2005年

因子	TEM	PRE	WND	ELEV	SLP	ASP	SOIL	VGT	LUC	POP
PRE	0.59									
WND	0.56	0.58								
ELEV	0.54	0.60	0.59							
SLP	0.21*	0.56	0.55	0.50						
ASP	0.14*	0.59*	0.58*	0.52	0.12*					
SOIL	0.33	0.65	0.65	0.59	0.30	0.28				
VGT	0.19*	0.57	0.56	0.53	0.16	0.13	0.32			
LUC	0.25*	0.67	0.67	0.59	0.20	0.18*	0.34	0.22*		
POP	0.14	0.55	0.54	0.51	0.13	0.09*	0.29	0.12	0.18	
SHEEP	0.77	0.79	0.82	0.77	0.75	0.77	0.80	0.75	0.80	0.74

(b) 2006—2010年

因子	TEM	PRE	WND	ELEV	SLP	ASP	SOIL	VGT	LUC	POP
PRE	0.54									
WND	0.54	0.52								
ELEV	0.48	0.54	0.55							
SLP	0.23*	0.51	0.52	0.45						
ASP	0.17*	0.53*	0.54*	0.46	0.13*					
SOIL	0.34	0.61	0.61	0.54	0.30	0.28				
VGT	0.21*	0.52	0.52	0.47	0.16	0.13*	0.32			
LUC	0.28*	0.62	0.62	0.54	0.21	0.19*	0.35	0.22*		
POP	0.14*	0.49	0.50	0.43	0.10	0.06*	0.27*	0.09	0.16	
SHEEP	0.69	0.67	0.69	0.66	0.63	0.63	0.69	0.62	0.69	0.60

(c) 2011—2015年

因子	TEM	PRE	WND	ELEV	SLP	ASP	SOIL	VGT	LUC	POP
PRE	0.57									
WND	0.55	0.56								
ELEV	0.53	0.57	0.56							
SLP	0.27*	0.56	0.55	0.49						
ASP	0.21*	0.58*	0.57*	0.51	0.12*					
SOIL	0.37	0.66	0.64	0.58	0.29	0.28				
VGT	0.26*	0.57	0.56	0.52	0.16	0.13*	0.32			
LUC	0.31*	0.67*	0.65	0.58	0.19	0.18	0.33	0.22*		
POP	0.20	0.54	0.54	0.50	0.12*	0.08*	0.28	0.11	0.17	
SHEEP	0.72	0.71	0.71	0.69	0.67	0.67	0.73	0.65	0.72	0.64

(d) 2016—2020年

因子	TEM	PRE	WND	ELEV	SLP	ASP	SOIL	VGT	LUC	POP
PRE	0.60									
WND	0.58	0.62								
ELEV	0.55	0.61	0.61							
SLP	0.26	0.58	0.55	0.51						
ASP	0.23*	0.61*	0.59*	0.51	0.13*					
SOIL	0.41	0.66	0.62	0.59	0.30	0.28				
VGT	0.26	0.60	0.56	0.53	0.17	0.13	0.33			
LUC	0.30	0.67	0.63	0.58	0.20	0.17*	0.34	0.21		
POP	0.23	0.58	0.54	0.52	0.16	0.11*	0.32	0.15	0.19	
SHEEP	0.66	0.72	0.73	0.71	0.67	0.64	0.73	0.64	0.70	0.63

q值 0.00 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50 0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90 0.95 1.00

注:TEM为年均温;PRE为年降水量;WND为年均风速;ELEV为高程;SLP为坡度;ASP为坡向;SOIL为土壤类型;VGT为植被类型;LUC为土地利用类型;POP为人口密度;SHEEP为牲畜数量。*表示2因子为非线性增强关系,其他数值均表示2因子为双因子增强关系,结果均通过α=0.05水平的检验。

图3　2001—2020年浑善达克沙地各阶段交互探测器结果

Fig. 3　Results of interactive detectors in each stage of Otindag Sandy Land from 2001 to 2020

(Figure of merit，FOM)为0.13，模拟结果较好。各情景下NDVI的空间分布如图5所示：各等级NDVI分布趋势总体上保持不变，低度植被覆盖区集中分布在研究区西部沙丘地区，高度植被覆盖区则位于东部地势平坦地区，各情景中不同植被覆盖区相互转化的区域主要位于研究区的中西部。在惯性发展情景中，低度植被覆盖区面积占比最大（10527 km^2，面积占比为25%），其次是中等植被覆盖区和较低植被覆盖区，面积占比分别为24%和22%。但较2020年植被覆盖整体提高，表现为中等植被覆盖区和较高植被覆盖区面积呈增加趋势，分别增加了1445 km^2和1309 km^2（表4）。在气候变化情景下，降

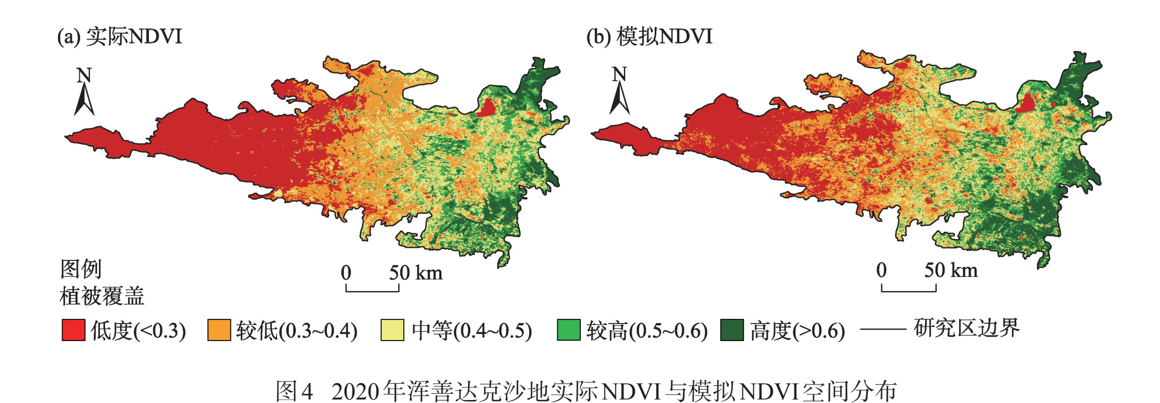


图4 2020年浑善达克沙地实际NDVI与模拟NDVI空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of actual NDVI and simulated NDVI in Otindag Sandy Land in 2020

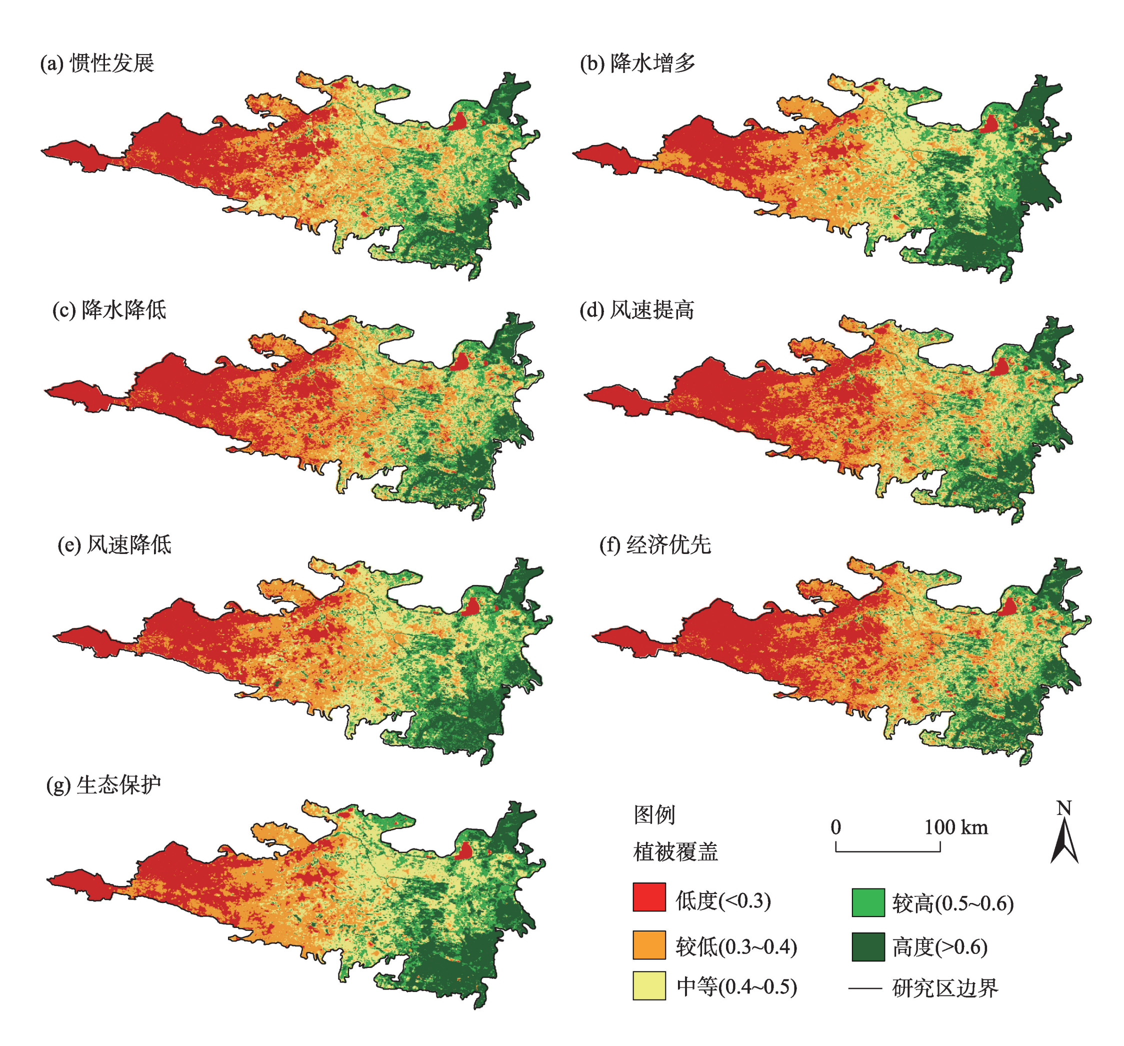


图5 2030年浑善达克沙地各情景下NDVI模拟空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of simulated NDVI under different scenarios in Otindag Sandy Land in 2030

水增多情景和风速降低情景的植被覆盖整体提高，较高植被覆盖区和高度植被覆盖区面积分别增加了1187 km^2和2855 km^2、1309 km^2和1311 km^2；而降水降低情景和风速提高情景下的植被覆盖整体降低，低度植被覆盖区面积分别增加了271 km^2和724 km^2。在经济优先情景下，增加牲畜饲养数量，模拟较高放牧压力情景下植被的演变状况，与2020年相比，低度植被覆盖区和较低植被覆盖区面积分别增加了716 km^2和162 km^2，即放牧会导致植被覆盖降低。在生态保护情景下，放牧密度降低，草地受到人类活动的破坏减少，较高植被覆盖区和高度植被覆盖区面积分别增加了1309 km^2和2995 km^2，植被覆盖增加面积明显高于降水增多情景和风速降低情景，进一步说明人类活动对NDVI的影响较单一气候影响大。

3 讨论

3.1 浑善达克沙地NDVI变化原因

2000—2020年浑善达克沙地的NDVI呈现波动上升的趋势，增加趋势为平均0.19 a^{-1}，且NDVI呈由西向东递增趋势，这与马永桃等[24]、安妮等[36]的研究结果相似。20 a间，浑善达克沙地向恢复方向发展，但其脆弱的生态环境仍受到气候变化和人类活动胁迫的威胁[14]。

分析发现，浑善达克沙地NDVI变化受到人类活动和自然因子的影响，其中以人类活动为主，q值最强的因子为SHEEP（表3）。较多研究均发现在我国北方草原区牲畜数量与NDVI有很强的相关关系[37-38]，是导致植被变化的主要驱动因素[39]。在自然驱动力方面，NDVI受到PRE和WND的影响（表3）。PRE是影响NDVI变化的主要气候因子，它决定着干旱区-半干旱区植被的空间分布和生长状态，为主要限制因子[40]，这与马永桃等[24]、李永利等[17]、Sun等[30]、Ma等[20]在浑善达克沙地的相关研究结论相一致。研究结果显示WND对研究区NDVI变化影响较大，这可能与其地貌特征有关，如陈宸等[41]也发现平均风速是新疆荒漠草地NDVI的重要影响因子。在植被较好的地区（固定沙地和低湿地等），风速增加导致土壤蒸散量增加，增加植物的水分胁迫，影响草地NDVI[42]；在植被较差的区域（半固定和流动沙地等），过高的风速吹走土壤、损伤植物幼苗等[43-44]。此外，因子探测分析中发现，TEM对NDVI解释能力较弱（4个研究时段q平均值在0.09~0.20之间）。这与李永利等[17]认为此沙地地上净初级生产力与年极端最高气温呈极显著相关关系（r=−0.4）的结果相左。可能的原因是本文采用平均温度指标（历年变化缓慢），而不像极端气温增加/变化明显，因此导致TEM对NDVI变化的解释能力较弱。另外，也有学者认为除春季外，中国北方草原区生长季各季节植被对温度的响应不如降水敏感[45-46]；王旭洋等[13]认为中国北方四大沙地NDVI变化对气温的变化不敏感，但也受到气温与降水的协同驱动[47]。本研究也支持该观点，TEM单因子对NDVI变化解释能力较弱（多期q值均值为0.14），而TEM与PRE的交互作用对NDVI变化影响较大，各研究时段q值均在0.54以上（图3）。

较长时间尺度上，气候因素控制植被覆盖分布格局，而在短时间内人为因素对植被覆盖的影响比气候因素更为严重[10]。本研究发现2000年后，虽然放牧是影响研究区植被变化的主要因子，但气候因

表4 浑善达克沙地现状及模拟各等级NDVI面积

Tab. 4 Area of actual and simulated NDVI of Otindag Sandy Land under different scenarios /km^2

年份	情景	情景名称	植被覆盖区分级				
			低度	较低	中等	较高	高度
2020	–	–	12034	10105	8531	5607	5469
2030（模拟）	惯性发展情景	惯性发展	10527	9141	9976	6916	5187
	气候变化情景	降水增多	7511	9141	9976	6794	8324
		降水降低	12305	10729	7992	5532	5188
		风速提高	12758	10227	7990	5760	5011
		风速降低	8933	9141	9976	6916	6780
	经济优先情景	放牧压力增加	12750	10267	7927	5499	5303
	生态保护情景	放牧压力减少	7249	9141	9976	6916	8464

子对NDVI的影响力逐渐增大，放牧等人类活动对NDVI的影响力在逐渐减弱(表3、图3)。这可能与生态恢复工程及相关的实施草畜平衡政策有关[31,48]，如2000年以后，相继开展的“京津风沙源头治理工程”等生态工程[49]，对区域植被覆盖变化产生了重要的影响[24]。且当地政府实施全区禁牧、休牧、草畜平衡工作，也促使植被恢复[31]。

3.2　政策启示

浑善达克沙地NDVI呈现“东高西低”的分布特征，植被改善的区域主要集中在浑善达克东南部、西部地区，植被改善不明显。结合情景分析，本文认为，采取因地制宜地分区治理方式，对不同的分区采取不同的治理对策。在植被较好的东部地区，利用与保护并举，遵循“以水定草，以草定畜”的原则，科学布局草业和畜牧业。把解决家畜超载问题作为遏制沙地退化的首要措施，根据降水的变动情况，动态判断草场承载能力。同时，把发展畜牧业产业化作为农牧业产业化突破口，有条件地区实施人工种草推进畜牧产业化。或通过产业结构调整以推动社会经济的发展[23]，发挥区位优势，积极发展沙地旅游、康养产业等。对于植被欠佳的中西部地区，以保护为主利用为辅。可借鉴牧民的传统放牧方式，将沙地作为冬季营地使用可有效保护沙地植被[12]；或实行跨区域草畜平衡，配合周边的典型草原区实行季节性倒场放牧或从周边农区调草；充分发挥“京津冀”生态服务供应地的作用，探索基于生态系统服务的转移支付，减少放牧对植被的影响，以应对未来气候变化所造成的不利影响。

4　结 论

(1) 2000—2020年浑善达克沙地的NDVI呈波动上升的趋势，年增加0.19。NDVI变化呈空间异质性，35.29%的区域呈现显著改善的趋势，显著改善的大部分地区集中在浑善达克沙地东南部，地表植被改善的面积大于植被退化的面积，植被显著退化的地区主要分布在研究区的东部。

(2) 放牧仍是影响研究区NDVI变化的主要因子，但气候因子对NDVI的影响力增大，放牧对NDVI的影响力在逐渐减弱。

(3) 虽然浑善达克沙地向恢复方向发展，但其脆弱的生态环境仍亦受到人类活动和气候变化的胁迫。多情景模拟结果为制定统筹区域社会经济发展与生态治理的草地恢复政策提供借鉴和数据支撑。

参考文献(References)

[1] Mea. Millennium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being-synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.

[2] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847−851.

[3] Huang J, Zhai J, Jiang T, et al. Analysis of future drought characteristics in China using the regional climate model CCLM[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(1−2): 507−525.

[4] Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166−171.

[5] Zhou D, Zhao X, Hu H, et al. Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1613−1626.

[6] 王牧兰, 包玉海, 银山. 浑善达克沙地动态变化影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004(增刊3): 44−47. [Wang Mulan, Bao Yuhai, Yinshan. Dynamic changes of the landscape structure of Hunshandake Sandy Land and analysis on its forming factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004(Suppl. 3): 44−47.]

[7] Wang J, He T, Guo X, et al. Dynamic changes of sandy land in northwest of Beijing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 121(1−3): 109−125.

[8] 丁国栋, 蔡京艳, 王贤, 等. 浑善达克沙地沙漠化成因、过程及其防治对策研究——以内蒙古正蓝旗为例[J]. 北京林业大学学报, 2004(4): 15−19. [Ding Guodong, Cai Jingyan, Wang Xian, et al. Causes, process and counter measures of desertification in Hunshandake Sand Land: Taking Zhenglan Banner, Inner Mongolia as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004(4): 15−19.]

[9] Zhao Y, Chi W, Kuang W, et al. Ecological and environmental consequences of ecological projects in the Beijing-Tianjin sand source region[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106111, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106111.

[10] Wang H, Yao F, Zhu H, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its response to climate factors and human activities in arid and semi-arid areas: Case study of the Otindag Sandy Land in China[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 5214, doi: 10.3390/su12125214.

[11] 同丽嘎, 宁小莉, 张靖, 等. 近30 a浑善达克沙地沙漠化时空演变特征及驱动机制研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 992−1002. [Tong Liga, Ning Xiaoli, Zhang Jing, et al. Spatial-temporal

variation and driving mechanism of desertification in Hunshandake (Otindag) Sandy Land in recent 30 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 992–1002.]

[12] 姚雪玲, 李龙, 王锋, 等. 放牧方式对浑善达克沙地榆树疏林退化的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1663–1671. [Yao Xueling, Li Long, Wang Feng, et al. Effects of grazing management on the degradation of *Ulmus pumila* open forest in Otindag Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1663–1671.]

[13] 王旭洋, 李玉霖, 连杰, 等. 半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 183–194. [Wang Xuyang, Li Yulin, Lian Jie, et al. Relationship between vegetation coverage and climate change in semi-arid sandy land and the significance to ecological construction[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 183–194.]

[14] 陈臻琦, 张靖, 张贻龙, 等. 基于VSD的近20 a来浑善达克沙地生态脆弱性变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1464–1473. [Chen Zhenqi, Zhang Jing, Zhang Yilong, et al. Spatio-temporal patterns variation of ecological vulnerability in Otindag Sandy Land based on a vulnerability scoping diagram[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1464–1473.]

[15] 于娜, 赵媛媛, 丁国栋, 等. 基于生态足迹的中国四大沙地地区可持续评价[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1310–1320. [Yu Na, Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, et al. Sustainability assessment in four sandy lands of China based on the ecological footprint model [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1310–1320.]

[16] Burrell A L, Evans J P, Liu Y. Detecting dryland degradation using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND)[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 197: 43–57.

[17] 李永利, 张存厚, 王英, 等. 浑善达克沙地地上净初级生产力动态及对气候变化的响应[J]. 草业科学, 2021, 38(1): 1–10. [Li Yongli, Zhang Cunhou, Wang Ying, et al. Dynamics of above-ground net primary production and its response to climate change in the Hunshandake sand[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 1–10.]

[18] Gou F, Liang W, Sun S, et al. Analysis of the desertification dynamics of sandy lands in northern China over the period 2000—2017[J]. Geocarto International, 2021, 36(17): 1938–1959.

[19] Kang W P, Liu S L, Chen X, et al. Evaluation of ecosystem stability against climate changes via satellite data in the eastern sandy area of northern China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 308: 114596, doi: org/10.1016/j.jenvman.2022.114596.

[20] Ma W, Wang X, Zhou N, et al. Relative importance of climate factors and human activities in impacting vegetation dynamics during 2000—2015 in the Otindag Sandy Land, northern China[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(4): 558–567.

[21] Zheng Y R, Xie Z X, Robert C, et al. Did climate drive ecosystem change and induce desertification in Otindag Sandy Land, China over the past 40 years?[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64 (3): 523–541.

[22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116–134.]

[23] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2895–2905. [Meng Qi, Wu Zhitao, Du Ziqiang, et al. Variation in fractional vegetation cover and its attribution analysis of different regions of Beijing-Tianjin sand source region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2895–2905.]

[24] 马永桃, 任孝宗, 胡慧芳, 等. 基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 195–204. [Ma Yongtao, Ren Xiaozong, Hu Huifang, et al. Vegetation dynamics and its driving force in Otindag Sandy Land based on geodetector [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 195–204.]

[25] 邓腾林, 宋一凡, 王明新, 等. 浑善达克沙地归一化植被指数动态变化及其对标准化降水蒸散发指数的时空响应关系[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(3): 221–230. [Deng Tenglin, Song Yifan, Wang Mingxin, et al. Dynamic variations of normalized difference vegetation index variations in Otindag Sand-Land and its spatio-temporal responses to standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(3): 221–230.]

[26] Dvorak M T, Armour K C, Frierson D M W, et al. Estimating the timing of geophysical commitment to 1.5 and 2.0 ℃ of global warming[J]. Nature Climate Change, 2022, 312, doi: 10.1038/s41558-022-01372-y.

[27] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落主要类型与特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 23–33. [Qi Danhui, Yang Hongxiao, Lu Qi, et al. Types and characteristics of plant communities in the Otingdag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41 (4): 23–33.]

[28] Zhang J, Li X, Buyantuev A, et al. How do trade-offs and synergies between ecosystem services change in the long period? The case study of Uxin, Inner Mongolia, China[J]. Sustainability, 2019, 11 (21): 6041, doi: 10.3390/SU11216041.

[29] Wu D, Zhao X, Liang S, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21 (9): 3520–3531.

[30] Sun R, Chen S, Su H. Climate dynamics of the spatiotemporal changes of vegetation NDVI in northern China from 1982 to 2015 [J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 187, doi: 10.3390/rs13020187.

[31] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 等. 锡林郭勒植被NDVI时空变化及其驱动力定量分析[J]. 植物生态学报, 2019, 43(4): 331–341. [Shi Na'na, Xiao Nengwen, Wang Qi, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its driving forces in Xilingol[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(4): 331–341.]

[32] Hao R, Yu D, Liu Y, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 718–728.

[33] Zheng K Y, Tan L S, Sun Y W, et al. Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: Evidence from typical areas in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107648, doi: org/10.1016/j.ecolind.2021.107648.

[34] Wang L, Yu D, Liu Z, et al. Study on NDVI changes in Weihe watershed based on CA-Markov model[J]. Geological Journal, 2018, 53: 435–441.

[35] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: The physical science basis[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2021: 32.

[36] 安妮, 宁小莉, 海全胜, 等. 基于MODIS数据的近15年浑善达克沙地植被净初级生产力时空分布研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 168–175. [An Ni, Ning Xiaoli, Hai Quansheng, et al. Optical model for estimating the spatial and temporal distribution of vegetation net primary productivity in Hunshandake Sandy Land in recent 15 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(4): 168–175.]

[37] Xie Y C, Sha Z Y. Quantitative analysis of driving factors of grassland degradation: A case study in Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. Scientific World Journal, 2012, 2012: 169724, doi: 10.1100/2012/169724.

[38] Hao L, Sun G, Liu Y Q, et al. Effects of precipitation on grassland ecosystem restoration under grazing exclusion in Inner Mongolia, China[J]. Landscape Ecology, 2014, 29: 1657–1673.

[39] Li A, Wu J, Huang J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of RESTREND in Inner Mongolia[J]. Landscape Ecology, 2012, 27(7): 969–982.

[40] Liu C, Melack J, Tian Y, et al. Detecting land degradation in eastern China grasslands with time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND) and GIMMS NDVI3g data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1014, doi: 10.3390/rs11091014.

[41] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 等. 近20年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 1–14. [Chen Chen, Jing Changqing, Xing Wenyuan, et al. Desert grassland dynamics in the last 20 years and its response to climate change in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 1–14.]

[42] Gardiner B, Berry P, Moulia B. Wind impacts on plant growth, mechanics and damage[J]. Plant Sciences, 2016, 245: 94–118.

[43] Wang X M, Lang L L, Yan P, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 67–75.

[44] Zou X Y, Li J F, Cheng H, et al. Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China[J]. Catena, 2018, 167: 429–439.

[45] Zhang G, Xu X, Zhou C, et al. Responses of grassland vegetation to climatic variations on different temporal scales in Hulun Buir Grassland in the past 30 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 634–650.

[46] 邵艳莹, 吴秀芹, 张宇清, 等. 内蒙古地区植被覆盖变化及其对水热条件的响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 33–42. [Shao Yanying, Wu Xiuqin, Zhang Yuqing, et al. Response of vegetation coverage to hydro-thermal change in Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40 (4): 33–42.]

[47] 贺军奇, 魏燕, 高万德, 等. 毛乌素沙地东南缘植被NDVI时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1523–1533. [He Junqi, Wei Yan, Gao Wande, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors in the southeastern margin of Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1523–1533.]

[48] Dong S K, Gao H W, Xu G C, et al. Farmer and professional attitudes to the large-scale ban on livestock grazing of grasslands in China[J]. Environmental Conservation, 2007, 34(3): 246–254.

[49] Zhang Y, Wang Q, Wang Z, et al. Impact of human activities and climate change on the grassland dynamics under different regime policies in the Mongolian Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134304, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134304.

Vegetation dynamic and its driving force and multi-scenario prediction in Otindag Sandy Land

LUO Jiayan[1], ZHANG Jing[1], XU Mengran[1], MO Yu[1], TONG Liga[2]

(1. College of Environment and Resources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China;
2. College of Architecture, Dalian Minzu University, Dalian 116650, Liaoning, China)

Abstract: In the context of future global warming, the vegetation in arid and semi-arid regions in China is more sensitive, and the balance between economic development and environmental protection remains challenging. Therefore, it is essential to conduct dynamic monitoring and driving factors assessment of vegetation in those areas. In this study, the spatiotemporal variation of NDVI in Otindag Sandy Land from 2000 to 2020 was first analyzed using Theil-Sen median trend analysis; next, the driving mechanism of NDVI change was analyzed using the Geodetector model. Finally, multiscenario analysis was used to reveal the future change trajectories of vegetation in the area. The results showed that the NDVI of Otindag Sandy Land exhibited upward fluctuation trends within 20 years, and grazing is the main factor affecting the changes in NDVI in Otindag Sandy Land; however, the effect of grazing to NDVI dynamics in the Otindag Sandy Land gradually weakened. In addition, the multiscenario prediction results show that, although the vegetation of Otindag Sandy Land is developing toward restoration, its fragile ecological environment and the vegetation status were still threatened by human activities and climate change. This study provides a theoretical basis for the Otindag Sandy Land ecological construction and restoration, as well as relevant countermeasures and suggestions according to the actual situation.

Key words: trend analysis; geodetector; multi-scenario prediction; NDVI; Otindag Sandy Land